

PENGARUH PENAMBAHAN AIR TERHADAP KUAT TEKAN DAN PENGEMBANGAN PADA BETON BUSA POLIMER HIBRIDA

Arya Tindak Wicaksana¹, Taufiq Rachman²

Mahasiswa Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang²

Email: aryawicaksana95@gmail.com, taufiq.rochman@polinema.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan air terhadap kuat tekan dan rasio mengembang beton busa polimer hibrida yang disusun dari resin unsaturated polyester (UP), isosianat (MDI), fly ash, limbah plastik, serta katalis MEKP dan kobalt. Variasi kadar air yang digunakan berkisar antara 0% hingga 20% terhadap berat MDI. Proses pencampuran dilakukan dengan dua metode, yaitu Metode I (air ditambahkan setelah MDI) dan Metode II (air ditambahkan sebelum MDI). Pengujian dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tekan awal serta rasio mengembang sebagai representasi struktur busa yang terbentuk. Hasil menunjukkan bahwa kadar air dan metode pencampuran berpengaruh signifikan terhadap performa mekanik dan karakteristik ekspansi. Kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 10,71 MPa diperoleh pada kadar air 0% (tanpa penambahan air). Namun, peningkatan kadar air hingga 14% pada Metode II menghasilkan kuat tekan lokal tertinggi sebesar 11,98 MPa, didukung oleh rasio pengembangan yang relatif stabil. Sebaliknya, rasio mengembang tertinggi tercatat sebesar 2,78 pada kadar air 8% dengan Metode I, meskipun kuat tekannya rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan ekspansi tidak selalu menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi. Dengan demikian, formulasi beton busa harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan tekan dan stabilitas struktur pori untuk menghasilkan material dengan performa optimal.

Kata kunci : beton busa ; polimer hibrida ; penambahan air ; kuat tekan ; struktur pori ;

ABSTRACT

This study aims to examine the effect of water addition on the compressive strength and expansion ratio of hybrid polyurethane foam concrete composed of unsaturated polyester resin (UP), isocyanate (MDI), fly ash, plastic waste, and MEKP-cobalt catalysts. Water content was varied from 0% to 20% by weight of MDI. Two mixing methods were applied: Method I (water added after MDI) and Method II (water added before MDI). Tests were conducted to evaluate early-age compressive strength and the expansion ratio, representing the resulting foam structure. The results showed that both water content and mixing method significantly affected mechanical performance and expansion characteristics. The highest average compressive strength of 10.71 MPa was achieved at 0% water content (no water added). However, increasing the water content to 14% using Method II produced a local peak compressive strength of 11.98 MPa, accompanied by relatively stable expansion. In contrast, the highest expansion ratio of 2.78 occurred at 8% water content using Method I, although the compressive strength was low. These findings indicate that higher expansion does not necessarily lead to greater strength. Therefore, polyurethane foam concrete formulation must balance compressive performance with pore structure stability to achieve optimal material performance.

Keywords : foam concrete ; hybrid polymer ; water addition ; compressive strength ; pore structure

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material konstruksi yang ringan, kuat, dan ramah lingkungan terus meningkat. Beton busa merupakan salah satu solusi yang banyak dikembangkan karena densitasnya rendah dan kemampuan isolasi termalnya tinggi[1]. Salah satu varian inovatif adalah beton busa

polyurethane hibrida, yang merupakan kombinasi resin unsaturated polyester dan isosianat dengan filler seperti flyash dan limbah plastik untuk meningkatkan karakteristik mekanik sekaligus memanfaatkan limbah industri dan plastik domestik.

Pembentukan struktur busa dalam sistem ini terjadi melalui reaksi antara resin dengan isosianat, menghasilkan pori-pori akibat gas yang terbentuk[2]. Pengaruh kadar air menjadi sangat krusial karena dapat memengaruhi pembentukan sel dan stabilitas busa[3]. Hal ini mencerminkan tren pada literatur material poliuretan, yang menunjukkan bahwa kadar air memainkan peran sebagai foaming agent—meningkatkan ekspansi dan porositas, namun jika berlebihan dapat menurunkan kekompakan dan kuat tekan material[4].

Namun, studi tentang kadar air optimal dalam beton busa polyurethane hibrida berbasis resin dan isosianat dengan filler *flyash* dan limbah plastik masih terbatas, khususnya terkait metode pencampuran air terhadap isosianat. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh kadar air dari 4% hingga 20% dari isosianat terhadap kuat tekan dan rasio mengembang pada beton busa polyurethane hibrida, serta membandingkan dua metode pencampuran air, yaitu penambahan air sebelum dan sesudah isosianat, untuk menentukan metode pencampuran optimal yang menghasilkan kuat tekan tertinggi.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh penambahan air terhadap kuat tekan beton busa polyurethane hibrida. Benda uji dibuat berbentuk kubus berukuran 5 cm × 5 cm × 5 cm sesuai dengan standar SNI 03-6825-2002[5].

Material utama penyusun beton busa terdiri atas resin *Unsaturated Polyester* (UP), *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI), *flyash* (FA), limbah plastik (LP), *Styrene Monomer* (SM), katalis *Metil Etil Keton Peroksida* (MEKP), dan akselerator kobalt (CO). Komposisi dasar campuran ditetapkan sebagai berikut: UP 34,5%, MDI 22%, FA 19%, LP 19%, SM 4%, MEKP 1%, dan CO 0,5%. Variasi yang diuji hanya terletak pada penambahan air, yaitu sebesar 0% hingga 20% terhadap berat MDI. Komposisi air ini ditambahkan untuk memicu pembentukan pori, sesuai prinsip reaksi poliuretana berbusa. Rincian kategori dan variasi kadar air disajikan berikut

Tabel 1 Variasi Kadar Air

No	Kode	Air (%dari MDI)
1	PA 0%	0
2	PA 4%	4
3	PA 6%	6
4	PA 8%	8
5	PA 10%	10
6	PA 12%	12
7	PA 14%	14
8	PA 16%	16
9	PA 18%	18

10 PA 20 % 20

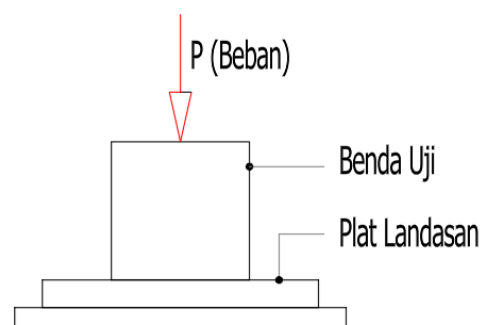
Pencampuran material dilakukan dengan dua metode: metode I (air ditambahkan setelah MDI) dan metode II (air ditambahkan sebelum MDI). Karena faktor pengembangan, berat isi campuran direncanakan sebesar 50% dari volume cetakan. Setelah tercampur merata, adonan segera dituangkan ke dalam cetakan dan dibiarkan mengembang hingga mencapai waktu setting yang stabil.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3 hari untuk mengevaluasi efek langsung penambahan air terhadap kekuatan awal beton busa. menggunakan Mesin Compressive Stress, mengacu pada SNI 03-6825-2002[5]. Benda uji dibebani hingga mengalami keruntuhan, dan kuat tekan dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{A}$$

dengan:

σ = Tegangan Kuat Tekan Beton (N/mm²)
 P = Beban Maksimum (N)
 A = Luas permukaan penampang benda uji (mm²)



Gambar 1 Skema Pengujian Tekan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kuat tekan yang diperoleh memberikan gambaran langsung mengenai pengaruh kadar air dan metode pencampuran terhadap kekuatan awal beton busa polyurethane hibrida. Pengujian dilakukan terhadap sampel dengan kadar air bervariasi antara 0% hingga 20% dari berat MDI, menggunakan dua metode pencampuran: Metode I (air setelah MDI) dan Metode II (air sebelum MDI). Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

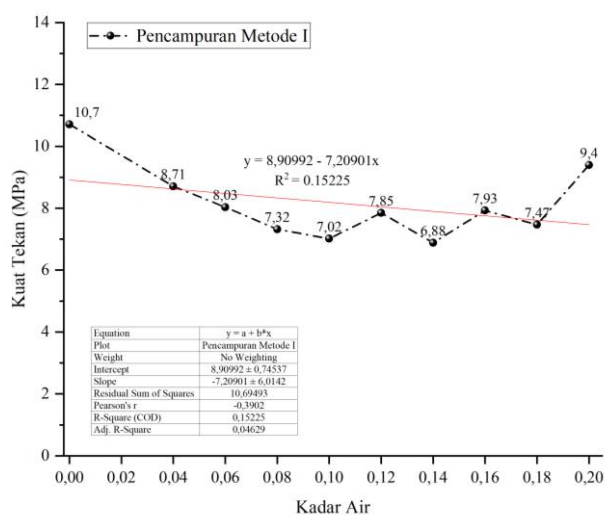
Tabel 2 Hasil Pengujian Tekan pada Berbagai Kadar Air

No	Kadar Air	Kuat Tekan (Mpa)		Kuat Tekan rata-rata (Mpa)
		Metode I	Metode II	
1	0%	10,71	10,71	10,71
2	4%	8,71	9,29	9,00
3	6%	8,03	7,52	7,77
4	8%	7,32	7,79	7,56
5	10%	7,02	9,52	8,27
6	12%	7,85	10,20	9,02

7	14%	6,88	11,98	9,43
8	16%	7,93	11,88	9,90
9	18%	7,47	9,43	8,45
10	20 %	9,40	9,13	9,27

Pengaruh Metode Pencampuran terhadap Kuat Tekan

Berdasarkan data pada tabel 2, terlihat bahwa penambahan air memberikan pengaruh yang kompleks terhadap kekuatan tekan beton busa. Pada Metode I, kuat tekan tertinggi dicapai pada PA 0% sebesar 10,71 MPa, dan mengalami penurunan secara umum seiring dengan bertambahnya kadar air hingga PA 14%. Setelah itu, nilai kuat tekan kembali meningkat, dengan nilai tinggi lainnya muncul pada PA 20% (9,40 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa metode pencampuran yang menambahkan air setelah MDI relatif tidak stabil dan cenderung menghasilkan sistem busa yang kurang homogen pada kadar air menengah.

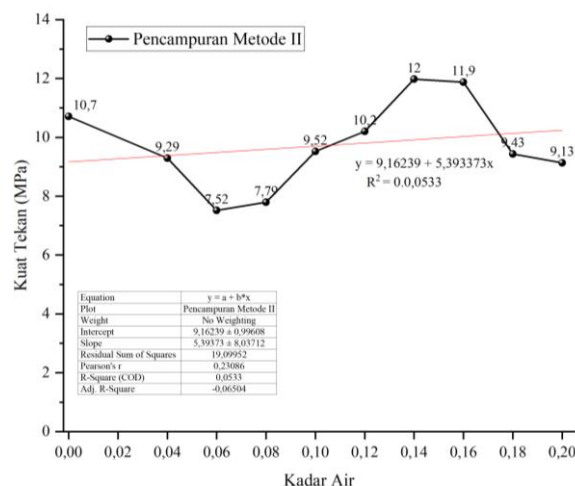


Gambar 2 Kuat Tekan Metode 1

Grafik pada Gambar 2 (Metode I) menunjukkan bahwa tren kuat tekan cenderung menurun seiring peningkatan kadar air. Nilai R^2 sebesar 0,152 mengindikasikan bahwa hanya sekitar 15,2% variasi kuat tekan dapat dijelaskan secara linier oleh kadar air, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain seperti reaktivitas kimia lokal, distribusi pori, dan viskositas campuran. Penambahan air setelah MDI (Metode I) berpotensi menyebabkan ketidaktercampuran optimal, sehingga menghasilkan pori-pori tidak stabil dan penurunan kekuatan tekan pada beberapa kadar air.

Sebaliknya, pada Metode II (air ditambahkan sebelum MDI), tren kuat tekan justru menunjukkan peningkatan yang signifikan pada kadar air menengah. Setelah mengalami penurunan pada PA 6% dan PA 8%, nilai kuat tekan meningkat drastis pada PA 12%, PA 14%, dan PA

16%, masing-masing mencapai 10,20 MPa, 11,98 MPa, dan 11,88 MPa. Puncak kekuatan ini mencerminkan bahwa air yang ditambahkan lebih awal dapat menyatu lebih merata dalam sistem sebelum reaksi kimia dominan terjadi, sehingga menghasilkan busa dengan pori-pori halus dan distribusi beban yang lebih merata pada struktur.

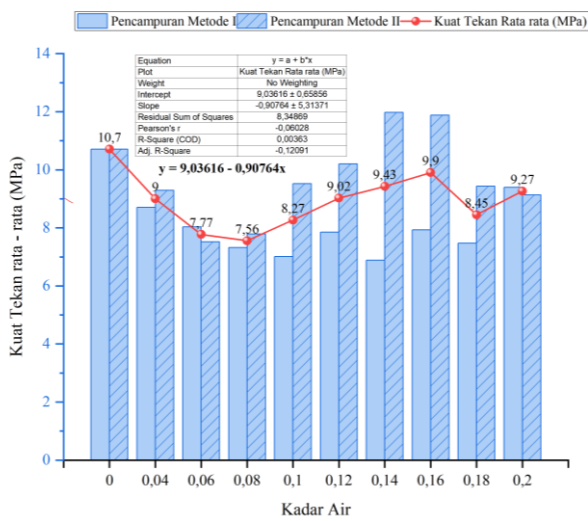


Gambar 3 Grafik Kuat Tekan Metode II

Berdasarkan Gambar 4 (Metode II), tren grafik menunjukkan peningkatan kuat tekan yang lebih jelas pada kadar air 10–16%. Meskipun nilai R^2 hanya 0,053, yang menandakan hubungan linier yang sangat lemah, grafik menunjukkan adanya puncak performa pada kadar air 14% dan 16% dengan kuat tekan masing-masing sebesar 11,98 MPa dan 11,88 MPa. Nilai slope regresi positif (5,39) mendukung bahwa penambahan air sebelum MDI dapat memperbaiki distribusi pori, memungkinkan pembentukan struktur internal yang lebih seragam dan kuat.

Evaluasi Kuat Tekan Rata - rata

Untuk memahami kecenderungan kuat tekan terhadap kadar air, dilakukan analisis regresi linier terhadap hasil pengujian dari masing-masing metode pencampuran dan nilai rata-ratanya.



Gambar 4 Grafik Kuat Tekan rata rata

Jika kedua metode digabungkan, terlihat bahwa tren kuat tekan rata-rata mengikuti pola menurun pada awal penambahan air, kemudian meningkat pada kadar menengah, dan kembali menurun di kadar tinggi. Gambar 4 menampilkan grafik batang dan garis rata-rata yang memvisualisasikan hal ini. Nilai rata-rata tertinggi tercatat pada PA 16% sebesar 9,90 MPa, disusul oleh PA 14% sebesar 9,43 MPa, dan PA 20% sebesar 9,27 MPa. Sebaliknya, nilai rata-rata terendah terjadi pada PA 8% sebesar 7,56 MPa.

Pada Gambar 5. Nilai R^2 sebesar 0,0036 atau 0,36% variabilitas yang dapat dijelaskan oleh hubungan linier. Ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa hubungan antara kadar air dan kuat tekan bersifat non-linier dan sangat bergantung pada mekanisme pencampuran, waktu reaksi, dan kestabilan struktur busa yang terbentuk. Dengan kata lain, meskipun penambahan air dapat memicu pembentukan gas dan meningkatkan porositas awal, keberhasilan pembentukan busa yang kuat sangat bergantung pada integrasi homogen air dalam campuran sebelum reaksi berlangsung cepat.

Fenomena ini sejalan dengan prinsip reaksi polyurethane, di mana air bereaksi dengan isosianat (MDI) menghasilkan karbon dioksida yang membentuk struktur pori. Namun, reaksi ini juga menghasilkan panas dan mempercepat polimerisasi. Jika air tidak terdistribusi merata atau ditambahkan terlalu lambat (seperti pada Metode I), maka pembentukan pori menjadi tidak terkendali, menghasilkan struktur kasar, pori besar, dan kekuatan tekan yang rendah. Sebaliknya, pencampuran awal (Metode II) memungkinkan air berinteraksi lebih stabil dalam sistem, memperbaiki tekstur busa dan meningkatkan integritas mekanik.

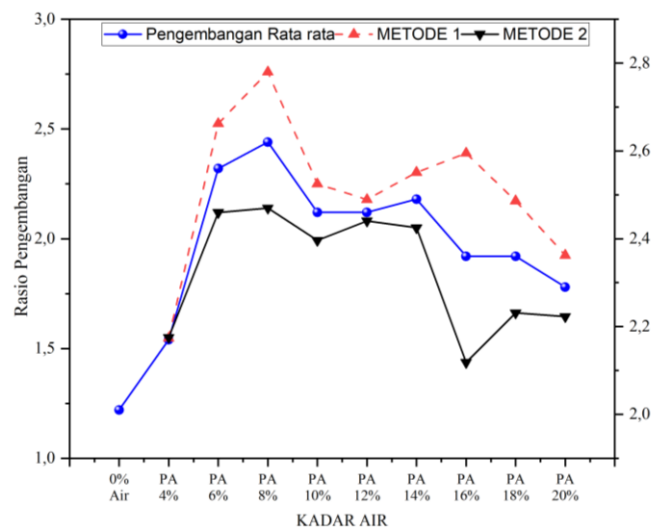
Pengaruh Penambahan Air terhadap Rasio Mengembang

Selain kuat tekan, aspek penting lain dalam evaluasi beton busa polyurethane hibrida adalah rasio mengembang, yang menunjukkan seberapa besar ekspansi volume campuran akibat pembentukan struktur pori. Data rasio mengembang pada berbagai kadar air dan metode pencampuran disajikan dalam Tabel 3 dan Gambar 5.

Tabel 3 Rasio Mengembang 2 Metode Pencampuran pada berbagai Kadar Air

No	Kadar Air	Rasio Mengembang		Rasio Mengembang Rata-rata
		Metode I	Metode II	
1	PA 0%	2,32	2,32	2,32
2	PA 4%	2,17	2,17	2,17
3	PA 6%	2,66	2,46	2,56
4	PA 8%	2,78	2,47	2,62
5	PA 10%	2,52	2,40	2,46
6	PA 12%	2,49	2,44	2,46
7	PA 14%	2,55	2,43	2,49
8	PA 16%	2,59	2,12	2,36
9	PA 18%	2,49	2,23	2,36
10	PA 20%	2,36	2,22	2,29

Tabel 3 memperlihatkan bahwa rasio mengembang cenderung meningkat pada kadar air rendah hingga menengah, kemudian menurun pada kadar air tinggi. Kadar air 8% menunjukkan rasio mengembang tertinggi pada Metode I sebesar 2,78, sedangkan rata-rata tertinggi dicapai pada kadar air 8% sebesar 2,62. Rasio mengembang tanpa penambahan air adalah 2,32



Gambar 5 Rasio Mengembang dua Metode Pencampuran pada Berbagai Kadar Air

Perbedaan respons antara Metode I dan Metode II juga cukup signifikan. Metode I secara umum menghasilkan rasio pengembangan lebih tinggi dibandingkan Metode II,

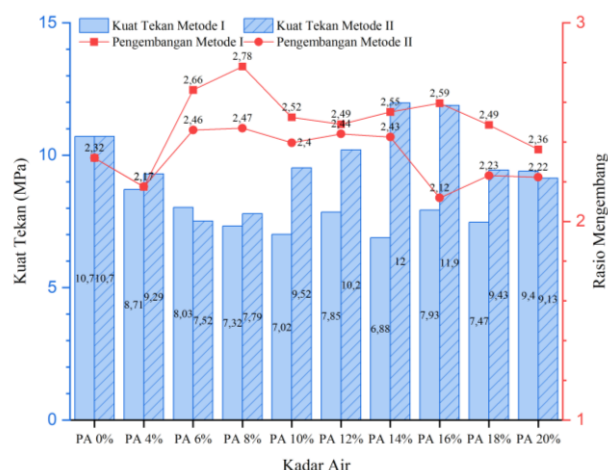
terutama pada kadar air 6% hingga 14%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan air setelah MDI (Metode I) memungkinkan reaksi pembentukan gas berlangsung lebih cepat, menghasilkan ekspansi volume yang lebih besar, meskipun hal ini juga berdampak pada penurunan kekuatan tekan.

Gambar 5 menggambarkan grafik hubungan antara kadar air dan rasio mengembang. Terlihat bahwa pada kadar air 6% hingga 10%, baik Metode I maupun Metode II mencapai puncak pengembangan. Namun, pada kadar air >14%, rasio mengembang mulai menurun — hal ini dapat dikaitkan dengan terbentuknya struktur pori yang tidak stabil akibat kelebihan air yang menyebabkan pencampuran tidak homogen.

Fenomena ini menguatkan hipotesis bahwa penambahan air memang berfungsi sebagai foaming agent, namun memerlukan kontrol ketat terhadap jumlah dan metode pencampurannya. Jika air ditambahkan secara tidak optimal, akan terjadi pembentukan pori berlebihan yang melemahkan struktur mekanik beton.

Keterkaitan Kuat Tekan dan Rasio Mengembang

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan negatif antara rasio mengembang dan kuat tekan. Sampel dengan rasio mengembang tinggi cenderung memiliki kuat tekan yang rendah, dan sebaliknya. Contohnya, kadar air 8% menunjukkan rasio mengembang rata-rata tertinggi (2,62), namun justru menghasilkan kuat tekan rata-rata terendah (7,56 MPa). Sebaliknya, kuat tekan tertinggi (11,98 MPa) pada PA 14% dengan Metode II terjadi pada rasio mengembang yang relatif moderat (2,49).



Gambar 6 Hubungan Kadar Air dengan Kuat Tekan dan Pengembangan

Hal ini menegaskan bahwa struktur busa yang terlalu ekspansif tidak menjamin kekuatan tekan yang tinggi, dan justru dapat mengindikasikan ketidakstabilan pori internal. Oleh karena itu, dalam formulasi beton busa poliuretan, perlu

dicapai keseimbangan antara kekuatan dan ekspansi, dengan mempertimbangkan tujuan akhir penggunaannya (misalnya bobot ringan vs kekuatan struktural).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan air terhadap kuat tekan beton busa polyurethane hibrida dengan dua metode pencampuran yang berbeda. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan air memengaruhi kuat tekan dan rasio mengembang secara signifikan, namun hubungan antara kadar air dan performa tidak bersifat linier. Terdapat tren penurunan kuat tekan dan peningkatan rasio mengembang pada kadar air rendah–menengah, diikuti oleh fluktuasi pada kadar tinggi.
2. Pencampuran dengan air ditambahkan sebelum MDI (Metode II) menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan metode I, terutama pada kadar air 12% hingga 16%.
3. Kuat tekan tertinggi tercapai pada kadar air 14% dengan Metode II, yaitu sebesar 11,98 MPa, sedangkan nilai tertinggi kedua dicapai pada kadar air 16% dengan nilai 11,88 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan air dalam jumlah terbatas dan pencampuran awal mampu membentuk struktur busa yang lebih stabil dan kuat.
4. Rasio mengembang tertinggi terjadi pada kadar air 8%, terutama pada Metode I, yaitu sebesar 2,78. Namun, pada titik ini kuat tekan justru rendah (7,32 MPa), menunjukkan bahwa rasio ekspansi yang tinggi tidak selalu berkorelasi dengan kekuatan mekanik yang baik.
5. Nilai R^2 yang rendah dari regresi linier menunjukkan bahwa kadar air bukan satu-satunya faktor yang menentukan kekuatan tekan, karena hasil sangat dipengaruhi oleh distribusi pori, laju reaksi, dan homogenitas campuran.
6. Hubungan antara rasio mengembang dan kuat tekan bersifat negatif, terutama saat rasio mengembang melebihi batas optimal. Struktur busa yang terlalu ekspansif dapat membentuk pori besar dan tidak stabil, yang menurunkan integritas mekanik beton busa.
7. Sampel tanpa penambahan air juga mampu mencapai kuat tekan tinggi sebesar 10,71 MPa, meskipun tidak mengalami ekspansi signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih dapat menghasilkan struktur padat dan kuat tanpa kontribusi air sebagai agen pembentuk pori. Maka, penambahan air sebaiknya disesuaikan dengan target karakteristik beton, karena meskipun membantu ekspansi, air yang berlebihan atau tidak

tercampur homogen dapat menurunkan performa mekanik.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan air dalam beton busa polyurethane hibrida memiliki pengaruh kompleks yang tidak hanya memengaruhi kekuatan mekanik, tetapi juga karakteristik ekspansi dan struktur pori. Pemilihan kadar air dan metode pencampuran yang tepat menjadi kunci dalam menghasilkan formulasi beton busa dengan performa optimal sesuai kebutuhan aplikatif, baik untuk tujuan struktural maupun non-struktural. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi awal bagi pengembangan material berbasis polyurethane dengan efisiensi berat dan kekuatan yang seimbang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Shah, K. H. Mo, Y. Soon Poh, J. Yang, and T.-C. Ling (Bill), "Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, p. 105103, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105103.
- [2] J. S. . ABIN CHANDY, "Study on Foamed Concrete With Polyurethane As Foaming," pp. 873–879, 2018.
- [3] L. Meng *et al.*, "How water acting as both blowing agent and plasticizer affect on starch-based foam," *Ind. Crops Prod.*, vol. 134, pp. 43–49, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.03.056.
- [4] J. Wang, S. Gao, C. Zhang, Y. Deng, and P. Zhang, "Preparation and Performance of Water-Active Polyurethane Grouting Material in Engineering: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 23, 2022, doi: 10.3390/polym14235099.
- [5] SNI 03-6825-2002, "Sni 03-6825-2002," *Standar Nas. Indones. Metod. Penguji. kekuatan tekan mortar semen Portl. untuk Pekerj. sipil*, p. 6825, 2002.